

**VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA**

**Fakulta strojní**

**Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení**

**Měření  $\Delta p - Q$  charakteristik hydraulického ventilu tlakové  
regulace**

**Measurement of  $\Delta p - Q$  Characteristics of Hydraulic  
Pressure Control Valve**

**Student:**

**Jiří Loveček**

**Vedoucí bakalářské práce:**

**Ing. Adam Bureček, Ph.D.**

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

## Zadání bakalářské práce

Student: **Jiří Loveček**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení  
Téma: Měření  $\Delta p - Q$  charakteristik hydraulického ventilu tlakové regulace  
Measurement of  $\Delta p - Q$  Characteristics of Hydraulic Pressure Control Valve  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Literární rešerše k problematice tlakové (PC) a Load Sensing (LS) regulace.
2. Návrh a realizace experimentálního zařízení pro měření  $\Delta p - Q$  charakteristik PC ventilu.
3. Experimentální měření  $\Delta p - Q$  charakteristik PC ventilu.
4. Vyhodnocení  $\Delta p - Q$  charakteristik PC ventilu.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Kolektiv autorů. *HYDRAULIKA - Komplexní přehled*. Rexroth Bosh Group, 2002, 248 s.
2. Kolektiv autorů. *Projektování a konstrukce hydraulických zařízení. Příručka hydrauliky, Svazek 3*. Mannesmann Rexroth GmbH, RCS 00281/10.88, 1. vydání, 1988, 362 s., ISBN 3-8023-02664.
3. KOPÁČEK, J., PAVLOK, B. *Tekutinové mechanismy*. VŠB - Technická univerzita Ostrava, 1994, 151 s., ISBN 80-248-0586-0.
4. PIVOŇKA, J. a kol. *Tekutinové mechanismy*. SNTL, Praha, 1987, 04-255-87.
5. KRIŠŠÁK, P. *Hydraulické radiace prvky*. Hydropneutech s.r.o., Žilina, 2013, 42 s., ISBN 978-80-970897-6-4.
6. STRÁŽOVEC, I., KUČÍK, P., GRINČ, L., KRIŠŠÁK, P. *Hydraulické prvky a systémy*. Hydropneutech s.r.o., Žilina, 1999, 230 s., 2. vydanie, ISBN 80-968150-0-8.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Adam Bureček, Ph.D.**

Konzultant bakalářské práce: Ing. Peter Zavadinka

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016



---

doc. Dr. Ing. Lumír Hružík  
vedoucí katedry



---

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ..... 16.5.2016 .....  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....<sup>16.5.2016</sup>.....  
.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Jiří Loveček

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Přilehlá 72, Ratíškovice, 69602

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Loveček, J. Měření  $\Delta p - Q$  charakteristik hydraulického ventilu tlakové regulace: Bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2016, 37 s. Vedoucí práce: Bureček A.

Předložená bakalářská práce se zabývá měřením  $\Delta p - Q$  charakteristiky šoupátkového ventilu tlakové regulace. V úvodu práce, je popsán princip funkce PC/LS regulace hydraulického systému a hydrogenerátoru pomocí ventilu. V navazující části jsou uvedeny příklady provedení regulace v hydraulických systémech z praxe. Následující kapitola popisuje stavbu jednotlivých částí regulačního ventilu a také stavbu hydraulické kostky. Dále tato práce obsahuje návrh hydraulického obvodu použitého ke konkrétním měřením výše zmíněného ventilu. Praktická část obsahuje popis postupu měření, který byl použit pro měření  $\Delta p - Q$  charakteristiky ventilu. V závěru práce jsou uvedeny výsledky měření a celý experiment je vyhodnocen.

Klíčová slova: ventil tlakové regulace, charakteristika, měření

## **ANOTATION OF BACHELOR THESIS**

Loveček J. Measurement of  $\Delta p - Q$  Characteristics of Hydraulic Pressure Control Valve: Bachelor Thesis, Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical engineering, Department of Control Systems and Instrumentations, 2016, 37 p. Thesis head: Bureček A.

This bachelor thesis deals with the measurement  $\Delta p - Q$  characteristics of slide valve pressure control. In the introduction of bachelor thesis describes the principle of function PC/LS control of the hydraulic system and the hydroelectric generator by a valve. In the next section are examples of regulation in the hydraulic systems used in practice. The following chapter describes the construction of each part of the control valve and the construction of the hydraulic cube. This bachelor thesis includes design of the hydraulic circuit used for specific measurement of the mentioned valve. The practical part contains a description of the measurement procedure used for the measurement  $\Delta p - Q$  characteristics of the valve. In bachelor thesis conclusion are results of measurement and the experiment is evaluated.

Key words: pressure control valve, characteristic, measurement

## **Poděkování**

*„ Tímto bych rád poděkoval Ing. Adamu Burečkovi, Ph.D. za cenné připomínky a odborné rady při vypracovávání této bakalářské práce.“*

# Obsah

Úvod .....	11
1. Jak funguje PC/LS regulace? .....	12
1.1 Princip funkce PC .....	12
1.2 Princip funkce LS .....	12
1.3 Vysvětlivky .....	13
1.4 Princip funkce PC/LS v hydraulickém obvodu .....	13
2. Užití v praxi .....	20
3. Prvky měřicího obvodu .....	22
3.1 Stavba regulačního ventilu .....	22
3.2 Hydraulická kostka .....	23
3.3 Hydraulický měřicí obvod .....	24
3.4 Postup měření .....	25
4. Výsledky měření .....	28
5. Závěr .....	34
Seznam použité literatury .....	35
Seznam obrázků .....	36
Seznam tabulek .....	37



## Seznam použitých symbolů

$p$	tlak	[MPa]
$Q$	průtok	[dm <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> ]
$t_t$	teplota	[°C]

## **Seznam zkratek**

PC                      Pressure Control

LS                      Load Sensing

## Úvod

Tématem této bakalářské práce je změření  $\Delta p - Q$  charakteristiky šoupátkového ventilu tlakové regulace. Tyto ventily se používají u hydraulických obvodů, kde je potřeba rychlá regulace výkonu systému při náhlých změnách jeho tlaku nebo zatížení.

V první kapitole je popsán princip funkce PC/LS regulace měřeného ventilu včetně ukázky na modelovém obvodu.

Druhá kapitola ukazuje užití řízení hydraulického systému pomocí ventilu v praxi. Ukázky přímo znázorňují propojení ventilu s hydraulickým obvodem ovládajícím pohyb a rychlost lžice čelního nakladače a vidlí u vysoko zdvižného vozíku.

Třetí kapitola obsahuje řez měřeným ventilem, včetně jeho popisu, dále pak hydraulickou kostku, pomocí které byl ventil připojen k měřicímu hydraulickému obvodu a návrh samotného hydraulického obvodu použitého k měření. Nakonec je zde popsán také postup měření.

V poslední kapitole jsou konečné výsledky měření. Jsou zde také grafy změřených  $\Delta p - Q$  charakteristik. Tyto výsledky jsou zde porovnány a zhodnoceny. Je zde rovněž ukázán rozdíl  $\Delta p - Q$  charakteristik u rozdílných teplot oleje při měření.

## **1. Jak funguje PC/LS regulace?**

### **1.1 Princip funkce PC**

Úkolem PC regulačního ventilu je přerušení průtoku dodávaného hydrogenerátorem při překročení požadovaného maximálního tlaku. Tento tlak je nastaven předepnutím pružiny uvnitř ventilu. Pro řízení snímá ventil tlak ve výtlačném otvoru hydrogenerátoru. Díky této funkci je obvod chráněn proti případnému přetížení [1].

PC ventil je namontován přímo na regulačním hydrogenerátoru. Aby bylo dosaženo okamžité odezvy na náhlé zvýšení či snížení výkonu.

### **1.2 Princip funkce LS**

LS část regulačního ventilu nám zajišťuje tlak a průtok, který je požadován hydraulickým systémem.

Komponenty potřebné k fungování PC/LS regulace v systému jsou: pístový hydrogenerátor s proměnným geometrickým objemem, na němž je tento ventil, který uvede hydrogenerátor do pohotovostního režimu. V tomto režimu je deska hydrogenerátoru vykloněna do takového úhlu, aby dodávaný průtok byl roven lekáži. Při obnovení pohonu zjistí průtokové požadavky systému a zajistí proměnlivý průtok, při měnících se průtokových požadavkách hydraulického systému. Tento ventil musí reagovat na měnící se tlak v celém systému a řídit podle těchto změn hydrogenerátor. Většina hydraulických systémů nepracuje při konstantním tlaku. Tlak systému se mění v závislosti na měnícím se zatížení [2].

Aby bylo dosaženo maximálního užitku z PC/LS prvku je další komponentou rozvaděč se speciálním senzorem, průchody (passages) a kontrolami (checks). Je-li systém v pohotovostním režimu a nepracuje, regulační ventil přeruší tlakový signál z poháněného hydromotoru do hydrogenerátoru. Průtokové požadavky systému jsou dány pohybem šoupátka. Tyto průtokové požadavky jsou od regulačního ventilu odeslány zpět k hydrogenerátoru řídicí cestou [2].

### 1.3 Vysvětlivky

**Modrá** – Přítok/Odtok: Jakýkoliv olej v obvodu, který není pod vysokým tlakem. Tento olej může být olej bez tlaku z hydrogenerátoru nebo olej vracející se do nádrže [2].

**Zelená** – Uzavřený olej: Olej v obvodu, který není přímo spojen s olejem pumpovaným hydrogenerátorem [2].

**Růžová** – Nízký tlak při nulovém úhlu: Jakýkoliv olej pod nízkým tlakem při nulovém úhlu desky hydrogenerátoru [2].

**Červená** – Pracovní tlak: Olej v obvodu pumpovaný hydrogenerátorem pod pracovním tlakem [2].

**Fialová** – Vysoký tlak při nulovém úhlu: Olej v obvodu pod maximálním tlakem nastaveným na kompenzačním ventilu [2].

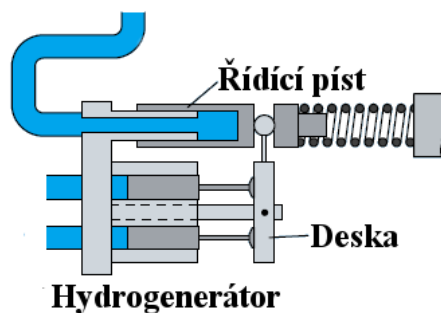
**Žlutá** – Pod nízkým tlakem při nulovém úhlu: Olej v hadici vedoucí z hydrogenerátoru hned po zapnutí [2].

### 1.4 Princip funkce PC/LS v hydraulickém obvodu

Hydraulický systém dokáže sám monitorovat jednotlivé veličiny, jako je tlak, průtok a zátěž a poté sám upraví svůj výkon pro dosažení nejvyšší účinnosti.

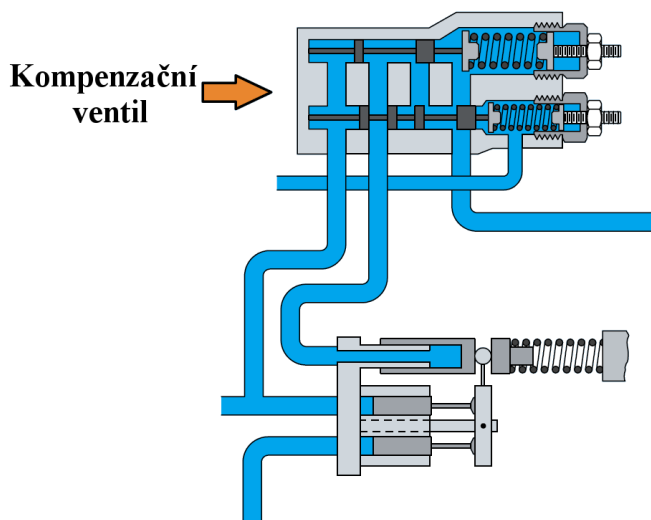
Vzorová ukázka fungování PC/LS regulace je znázorněna na zjednodušeném hydraulickém obvodu.

Na prvním obrázku můžeme vidět regulační axiální pístový hydrogenerátor a řídicí píst.



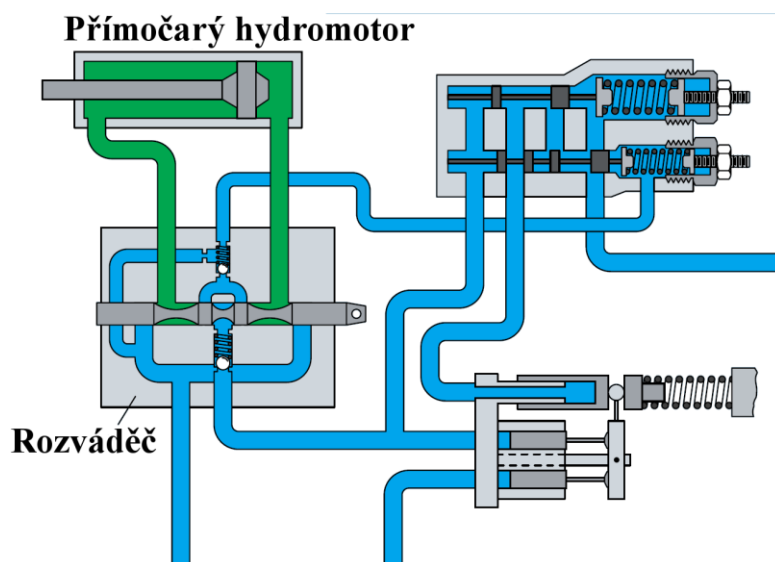
Obr. 1 Regulační hydrogenerátor [2]

Obrázek 2 znázorňuje napojení kompenzačního ventilu přímo k hydrogenerátoru, tento ventil dostává signál ze systému a reguluje výkon hydrogenerátoru. Ventil obsahuje dvě šoupátka. U PC části je šoupátko spojeno s pružinou, předepnutou na vysoký tlak, u LS části je pružina předepnuta na nízký tlak. U této části je také tlakový signál přiveden na druhou stranu šoupátka k části s pružinou, přičemž tato část slouží také jako kontrola průtoku [2].



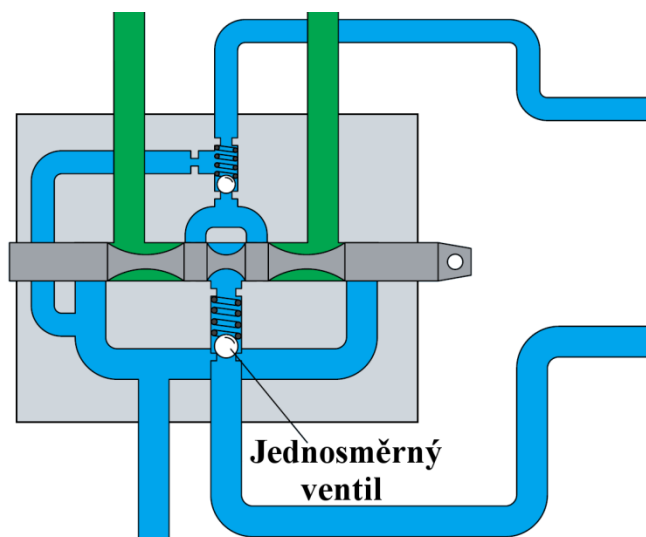
Obr. 2 Hydrogenerátor a kompenzační ventil [2]

Dalšími hlavními komponenty jsou rozváděč a přímočarý pístový hydromotor. Pro jednoduché a názorné popsání funkce použijeme v obvodu pouze jeden rozváděč s hydromotorem, viz obr. 3. V praxi může být použito více těchto součástí najednou [2].



Obr. 3 Hydraulický obvod [2]

Pro potřeby popisu funkce ventilu byl v obvodu použit rozváděč s uzavřeným středem, zobrazený na obr. 4, u něž šoupátko ve středové poloze zabráňuje průtoku kapaliny dodávané hydrogenerátorem. Rozváděč rovněž obsahuje jednosměrný ventil, který se otevře, jakmile se tlak z hydrogenerátoru vyrovná tlaku v hydromotoru, dále tento ventil zabráňuje vracení oleje zpět do hydrogenerátoru [2].

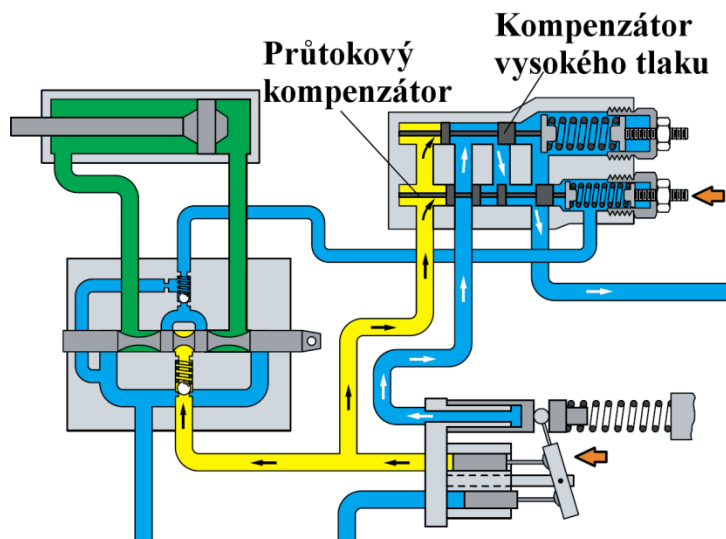


Obr. 4 Rozváděč [2]

Na začátku funkce máme neaktivní systém, který má být uveden do chodu. V tomto systému je nulový tlak, tudíž je šoupátko LS části přestavěno vlevo. Olej v řídicím pístu desky hydrogenerátoru má proto volnou cestu do nádrže, jak je znázorněno bílými šipkami na obr. 5 [2].

Díky tomu, že je systém bez tlaku, který by působil proti kontrolnímu pístu, je deska vykloněna pod svým maximálním úhlem, který zajišťuje nevyšší průtok.

Po uvedení hydrogenerátoru do chodu, je průtok zablokován uzavřeným rozváděčem, jak lze vidět na obr. 5 [2].

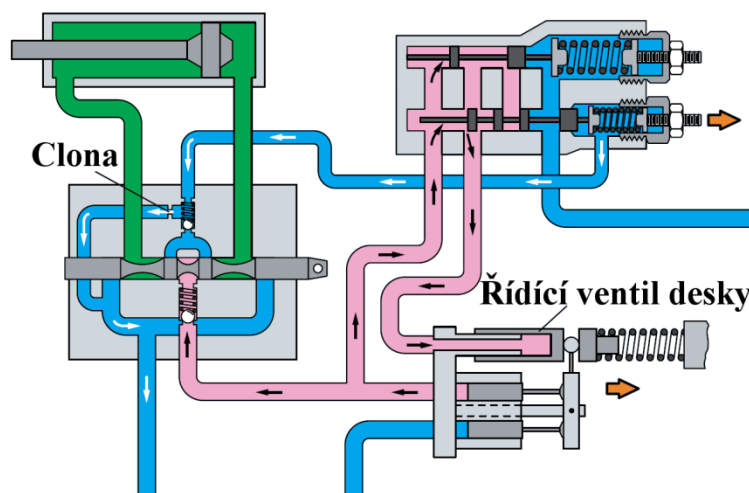


Obr. 5 Hydraulický obvod po spuštění [2]

Tento průtok tedy vede z hydrogenerátoru do regulačního ventilu, kde začne působit na levou stranu šoupátek obou částí. Všechny tyto děje, které se odehrávají během zlomku sekundy [2].

Při zvýšení systémového tlaku, na hodnotu vyšší než je hodnota nastavená na pružině LS části, se šoupátko posune směrem vpravo, viz obr. 6. Tímto se otevře cesta ke kontrolnímu pístu desky, který se začne posouvat proti své pružině. Deska se přestaví do téměř nulového úhlu a hydrogenerátor nyní dodává do systému pouze průtok, který je roven lekáži [2].

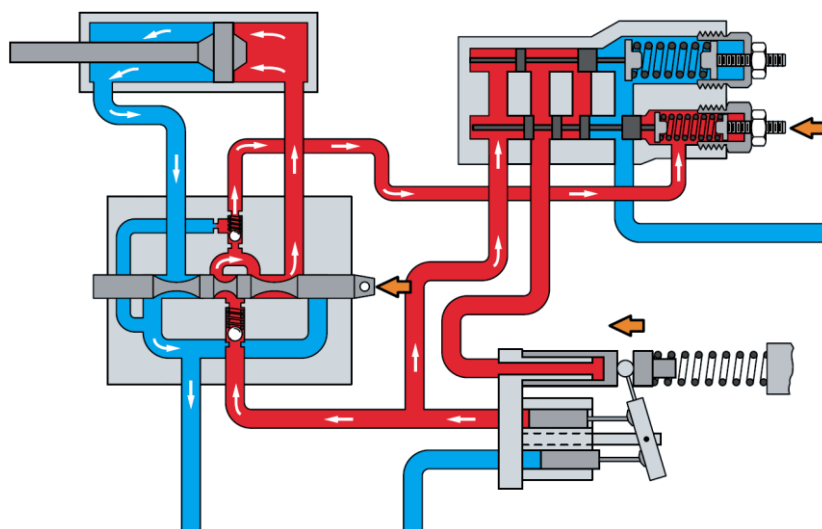




Obr. 6 Hydraulický obvod při PC odstavení [2]

Při tomto procesu je také vytlačován olej z prostoru pružiny LS části do rozváděče, kde protéká do nádrže skrz clonu.

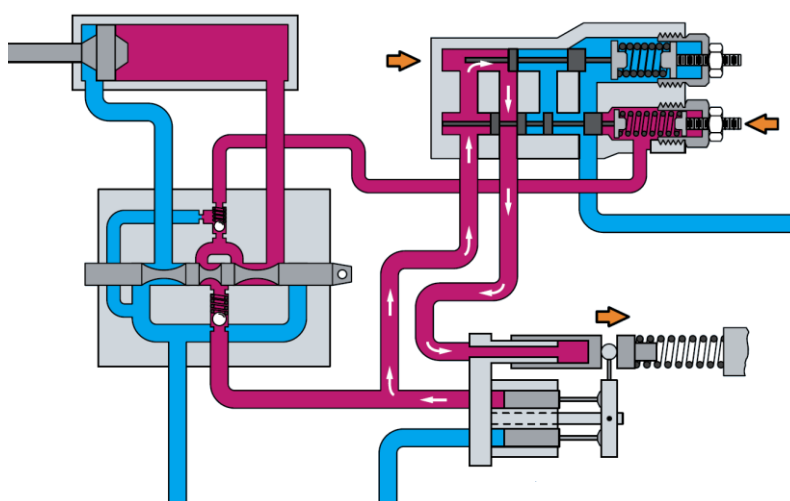
Nyní přestavíme šoupátko rozváděče vlevo. Kapalina tak může procházet přes kontrolní cestu do pravé části LS. Následkem toho dojde ke zvýšení tlaku předepnutého v LS části o tlak oleje a přestaví se tím šoupátko této části vlevo. Poté začne odtékat kapalina z řídicího pístu desky hydrogenerátoru a deska se tím vykloní na vyšší úhel, čímž se zvýší dodávaný průtok i tlak. Nyní protéká kapalina přes jednosměrný ventil v rozváděči. Velikost clony není tak velká, aby způsobovala ve větvi vedoucí k LS pružině tlakovou ztrátu. Při větším přestavení rozváděče dochází ke zvětšení průtočného průřezu kolem šoupátka. Šoupátko LS části se přestaví více vlevo a umožní odtok kapaliny z řídicího pístu desky hydrogenerátoru. Tím je zajištěn vyšší proud a tlak kapaliny, jak lze vidět na obr. 7[2].



Obr. 7 Hydraulický obvod při LS regulaci [2]

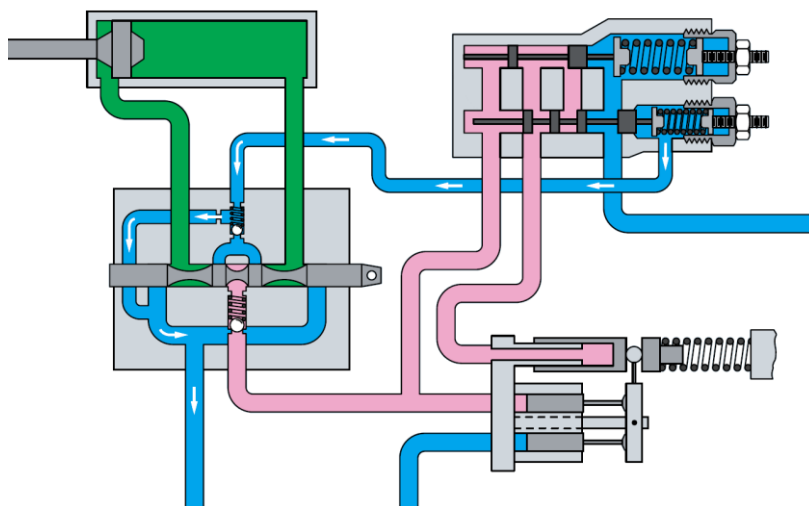
Hydrogenerátor je regulován podle průtokových a tlakových požadavků systému.

Když dosáhne píst hydromotoru konečné polohy, přestane v obvodu proudit kapalina a dojde ke zvyšování tlaku. Jakmile tlak překročí hodnotu předepnutí pružiny PC části, začne se šoupátko přestavovat směrem vpravo proti pružině. Kapalina začne opět proudit do řídicího pístu desky hydrogenerátoru a deska se přestaví do téměř nulového úhlu, viz obr. 8 [2].



Obr. 8 Hydraulický obvod při LS odstavení[2]

Na obr. 9 byl rozváděč přestaven do střední polohy. Díky tomu kapalina, která vyvíjela tlak na pravou stranu šoupátka u kompenzátoru průtoku, začne odtékat přes clonu v rozváděči do nádrže. Není tím ale snížen tlak kapaliny, působící na řídicí ventil hydrogenerátoru, a proto nadále zůstane v pohotovostním režimu [2].



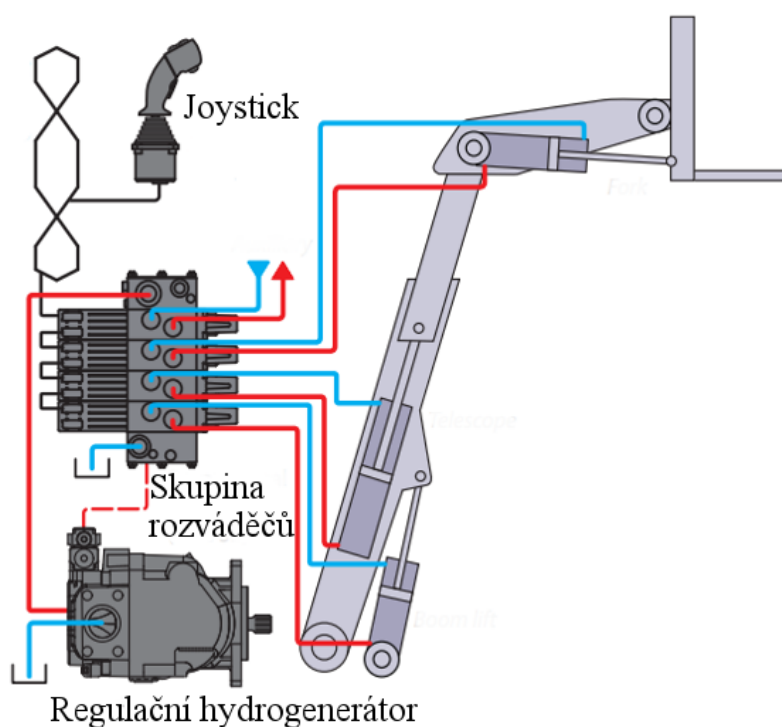
Obr. 9 Odtok kapaliny z PC části ventilu [2]

## 2. Užití v praxi

PC only – používá se jako ochranný prvek např. pro kombajny, hydrogenerátory doplňující olej v motoru a také tam, kde je potřeba konstantní tlak, jako např. lisy s konstantním tlakem.

PC/LS – používá se všude, kde je potřeba ovládat rychlost bez závislosti na nákladu jako např. u bagrů, zdvihačů nákladu, čelních nakladačů.

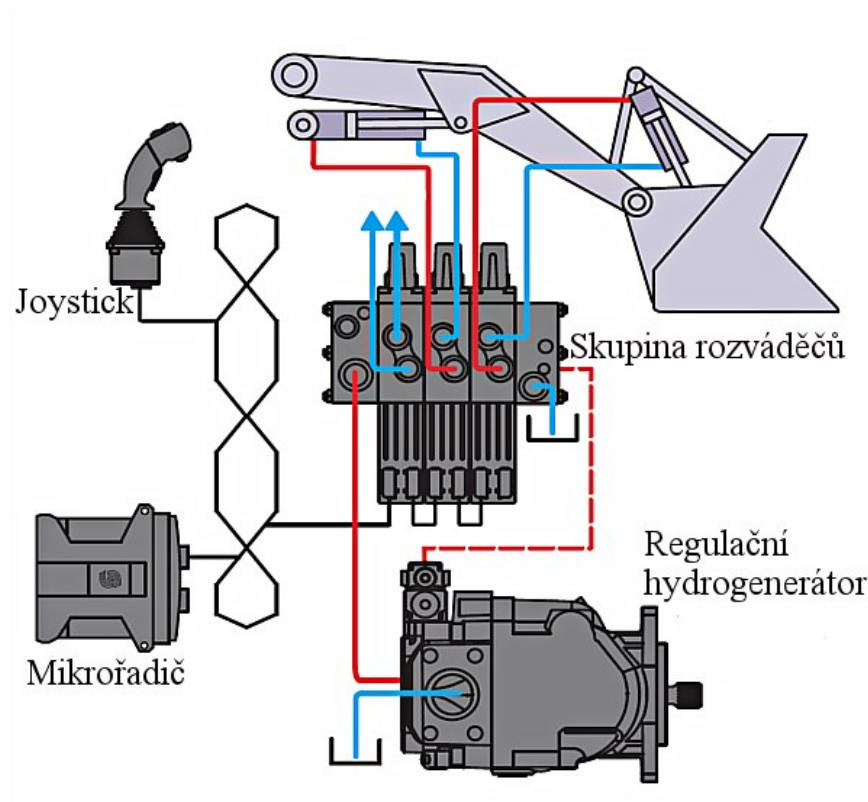
LS only – v praxi se téměř nevyužívá.



Obr. 10 Příklad užití u vysoko zdvižného vozíku [3]

Na tomto modelovém příkladu lze ukázat, že signál jde z rozváděče do ventilu. Díky tomuto signálu může PL/LS ventil regulovat výkon čerpadla tak, aby se při signálu z Joysticku pohybovala zvedací vidlice konstantní rychlostí, aniž by záleželo na hmotnosti zvedaného břemene.

Provedení na obrázku 10 znázorňuje přímé spojení ventilu s rozváděčem červenou přerušovanou čarou.

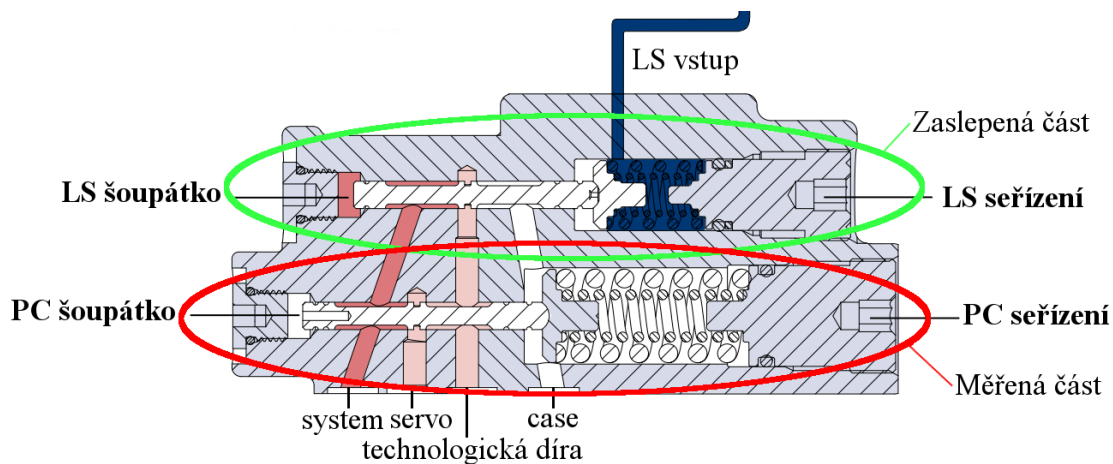


Obr. 11 Příklad užití u čelního nakladače [4]

U příkladu na obrázku 11, podobně jako u předchozího, nezáleží na váze hmoty zvedané lžicí nakladače. Navíc v těchto případech funguje PC/LS ventil jako pojistka, pokud by zvedané břemeno nebo jeho část ze lžice spadly, tento ventil funguje tak, že se lžice bude pohybovat stále stejně rychle a nehrozí tudíž nebezpečí rychlého posunutí.

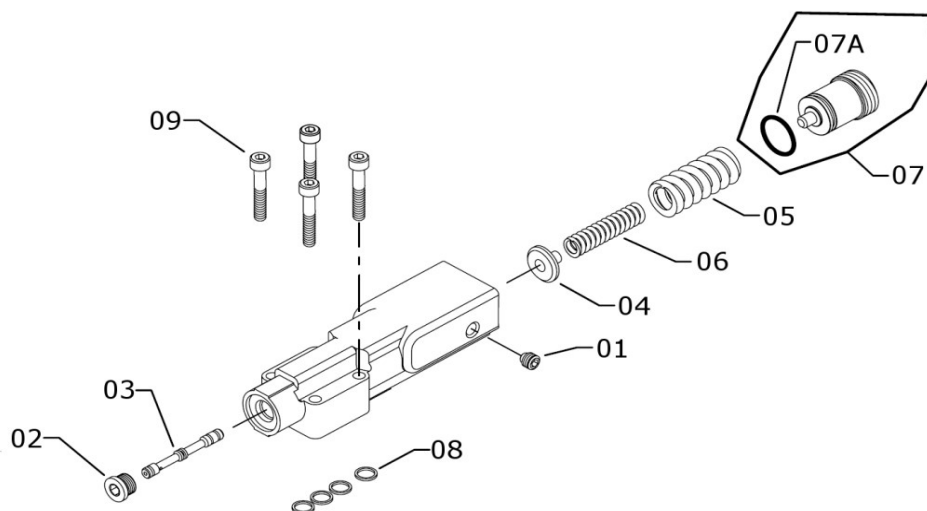
### 3. Prvky měřicího obvodu

#### 3.1 Stavba regulačního ventilu



Obr. 12 Řez regulačním ventilem [5]

Na obrázku 12 vidíme řez zkoumaným ventilem. Horní část ventilu se nazývá LS regulace, neboli průtoková regulace. Tato část byla zaslepena pomocí hřídelky, broušené na rozměr menší o 0,01 mm než je otvor pro šoupátko, aby se zabránilo ovlivnění experimentu touto částí. Spodní část ventilu se nazývá PC regulace, neboli tlaková regulace. Touto částí se zabývá náš experiment. Všimněme si, že do LS části je přiveden tlakový signál a to do části s pružinou, který zajišťuje přesnější regulaci za chodu.



Obr. 13 Sestava ventilu [6]

**Součásti:**

01– Stavěcí šroub, 02 – Zátka, 03 – Šoupátko, 04 – Trn pružiny, 05 – Vnější pružina, 06 – Vnitřní pružina, 07 – Seřizovací zátka, 07A – O-kroužek, 08 – Těsnící kroužky, 09 – Šrouby

Na obrázku č. 13 vidíme celou sestavu měřené PC části regulačního ventilu. Vidíme, že pro dosažení předepnutí na požadovaný tlak jsou použity dvě pružiny. Tyto pružiny jsou následně více předepnuty seřizovací zátkou.

**3.2 Hydraulická kostka**

Pro propojení ventilu se systémem a jeho následné změření, bylo zapotřebí vyrobit hydraulickou kostku. Tato kostka se skládá ze 4 hlavních vstupů, na obr. 14 jsou tyto cesty znázorněny modře. Zapojují se do nich hadice hydraulického obvodu. Dále jsou na kostce 4 vedlejší vstupy, které jsou na obrázku označeny zeleně. Do otvorů se zapojují Minimes přípojky a do přípojek se dále zapojují senzory pro měření tlaku. Poslední značené otvory v obrázku jsou montážní otvory, které označujeme červeně a slouží pro upevnění ventilu k hydraulické kostce.

Cesta č. 1 na obrázku, je označována jako “SYSTEM“ připojení ventilu, tato cesta je v experimentu připojena na vstup oleje do ventilu. Cesta č. 2 je označována jako “SERVO“. Tato cesta je také v experimentu připojena a slouží jako odtoková cesta oleje z ventilu. Cesta č. 3 je označována jako “technologické díra“. Tato cesta je v praxi nevyužitá a bývá zaslepená, ale v našem experimentu je k ní připojena hadice, pro případnou lekáž. Cesta č. 4 je označována jako “CASE“. V našem experimentu je tato cesta zaslepena a nepoužívá se.





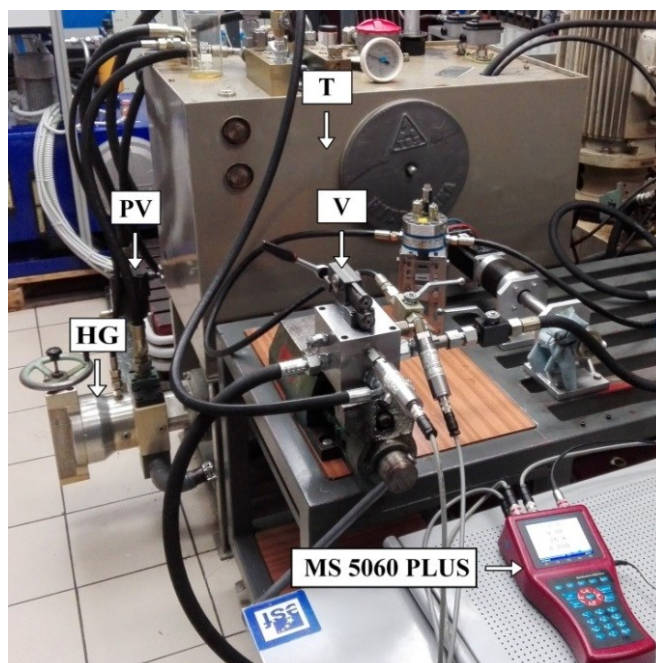
Na obrázku 15 je schéma hydraulického obvodu. V obvodu je zapojen hydrogenerátor HG, za ním je zapojen jednosměrný ventil JV a pojistný ventil PV. Tato cesta dále pokračuje do “SYSTEM“ cesty ventilu V. Před vstupem do ventilu je k ní připojen tlakový senzor S1, měřící tlak  $p_1$ . Výstupní cestou ventilu V je “SERVO“. K této cestě je dále připojen tlakový senzor S2, měřící tlak  $p_2$ . Poté je do systému zapojen průtokoměr S3, měřící tlak  $Q$  a teploměr S4, měřící teplotu  $t_t$ . Obvod končí v nádrži T.

#### Seznam použitých prvků

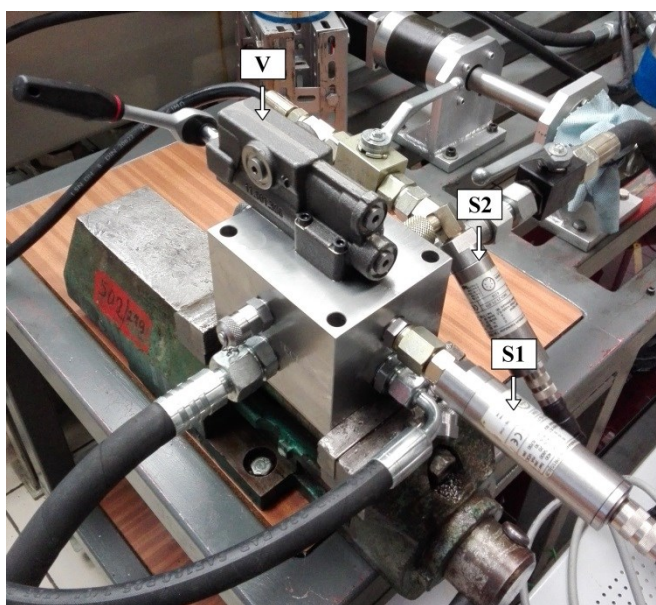
**T** – Nádrž; **HG** – Hydrogenerátor PPAR 2-63 10AP, TOS; **PV** – Pojistný ventil ARAM-20/350, ATOS; **JV** – Jednosměrný ventil; **V** – Ventil tlakové regulace; **S1** – Snímač tlaku PR15 Hydrotechnik, měřící rozsah (0 – 400) bar, analogový výstup (4 – 20) mA; **S2** – Snímač tlaku PR15 Hydrotechnik, měřící rozsah (0 – 60) bar, analogový výstup (4 – 20) mA; **S3** – Zubový průtokoměr GFM 70 Hydrotechnik, frekvenční výstup; **S4** – Snímač teploty Pt 100 Hydrotechnik, měřící rozsah (-50 – +200) °C, analogový výstup (4 – 20) mA; **MS 5060 Plus** – Univerzální měřicí přístroj Hydrotechnik

### 3.4 Postup měření

Pro změření  $\Delta p$ - $Q$  charakteristiky je nejprve nutné nastavit, pomocí pojistného ventilu PV na hydrogenerátoru HG, tlak  $p_1 = (2,5; 5; 7,5)$  MPa na vstupu do ventilu V. Poté se nastaví takové předepnutí pružiny, aby se rovnalo tlaku na pojistném ventilu a zajistilo se tak uzavření průtočné plochy mezi kanály “SYSTEM“ a “SERVO“. To poznáme tak, že měřená hodnota tlaku  $p_2 = 0$  Pa a hodnota průtoku  $Q = 0 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ . Následně se zvyšuje vstupní tlak  $p_1$  pomocí pojistného ventilu PV až do maximálního otevření výstupní cesty, kdy se průtok  $Q$  již dále nezvyšuje. Při každém kroku se vždy zaznamenají hodnoty veličin  $p_1, p_2, Q, t_t$ .



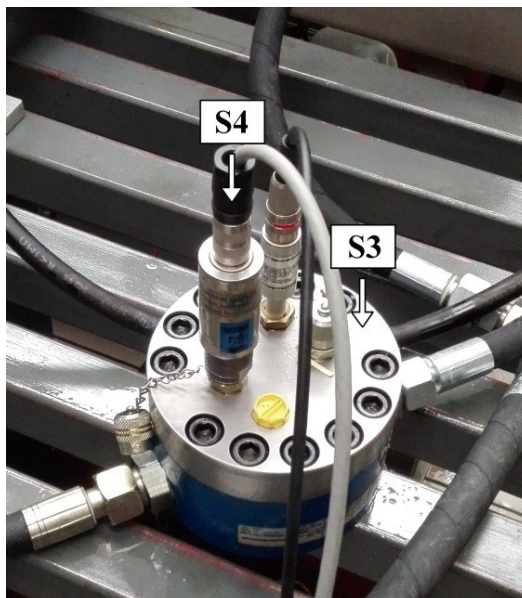
Obr. 16 Foto z měření ventilu



Obr. 17 Foto zapojení ventilu

Na obrázku 16 vidíme měřený hydraulický obvod. Vlevo dole se nachází hydrogenerátor HG, nad ním je zapojen pojistný ventil PV, vedle těchto prvků je umístěná nádrž T. V popředí můžeme vidět měřený regulační ventil V umístěný na hydraulické kostce se zapojenými tlakovými senzory S1 a S2. Na stolku u ventilu se nachází univerzální měřicí přístroj Hydrotechnik MS 5060 Plus, pomocí kterého probíhalo měření veličin.

Obrázek 17 blíže ukazuje zapojení měřeného ventilu včetně zapojení jednotlivých tlakových senzorů do hydraulické kostky. Tlakový senzor S1, umístěný zepředu do “SYSTEM“, snímá hodnoty tlaku  $p_1$ , tlakový senzor S2, umístěný napravo do “SERVO“, snímá hodnoty tlaku  $p_2$ . Strana kostky, se zaslepeným senzorovým vstupem, má zapojenou hadici přímo do nádrže kvůli případné lekáži, tato cesta je spojena s “technologickou dírou“ ventilu.



Obr. 18 Zapojení průtokoměru a teploměru

Na obrázku 18 vidíme zapojení průtokoměru s teploměrem. Senzor S3 je zubový průtokoměr a slouží ke snímání průtoku  $Q$ . Senzor S4 je teploměr, snímá teplotu  $t_t$ , je také přímo zapojen do průtokoměru a snímá okamžitou teplotu oleje protékajícího průtokoměrem.

## 4 Výsledky měření

Měření bylo prováděno pro počáteční tlaky  $p_1 = (2,5; 5 \text{ a } 7,5) \text{ MPa}$ , při kterých dochází otevření průtočného průřezu mezi kanály “SYSTEM“ a “SERVO“. Tyto tlaky jsou před začátkem každého měření nastaveny na pojistném ventilu PV a předepnutím pružiny ventilu V. Hodnoty pro jednotlivá měření jsou seřazeny v tabulkách 1, 2, 3 a 4.

Počáteční otevírací tlak $p_1 = 2,5 \text{ MPa}$				
$p_1$	$p_2$	$\Delta p$	$Q$	$t_i$
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[dm <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> ]	[°C]
2,5	0	2,5	0	46,5
3,14	0,007	3,133	0,759	46,5
3,51	0,02	3,49	1,72	46,5
3,96	0,047	3,913	3,111	46,5
4,42	0,1	4,32	5,069	46,5
5	0,172	4,828	7,35	46,6
5,44	0,247	5,193	9,131	47
5,97	0,332	5,638	11,146	47,3
6,46	0,432	6,028	13,114	47,6
6,99	0,597	6,393	15,923	48
7,51	0,857	6,653	18,83	48,5
8,02	1,028	6,992	20,644	49,2
8,58	1,434	7,146	24,343	49,7
9,11	1,776	7,334	26,972	50,1
9,63	2,047	7,583	29,037	50,6
10,01	2,325	7,685	30,964	51,1
10,48	2,568	7,912	32,58	51,9

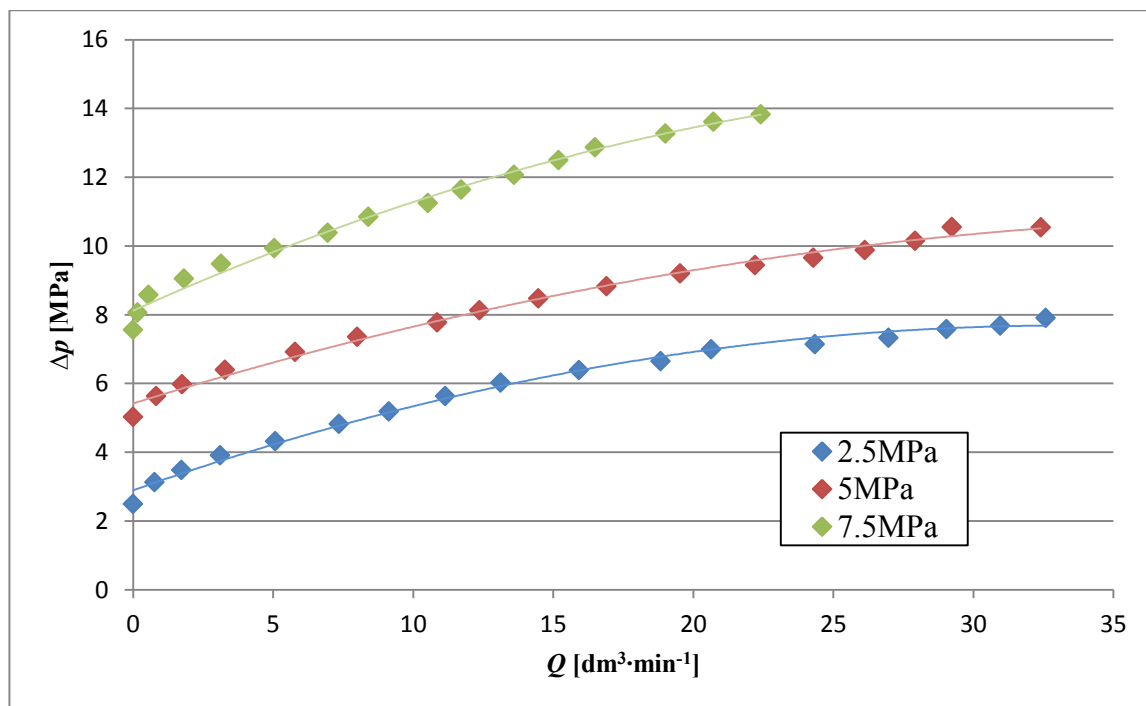
Tabulka 1: Hodnoty měření pro počáteční tlak  $p_1 = 2,5 \text{ MPa}$

Počáteční otevírací tlak $p_1 = 5$ MPa				
$p_1$	$p_2$	$\Delta p$	$Q$	$t_t$
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[dm <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> ]	[°C]
5,03	0,001	5,029	0	50,3
5,64	0,0026	5,6374	0,824	50,2
6	0,021	5,979	1,745	50,2
6,45	0,052	6,398	3,278	50,1
7,04	0,123	6,917	5,782	50
7,56	0,203	7,357	8,002	50
8,1	0,324	7,776	10,85	50,1
8,54	0,404	8,136	12,364	50,2
8,99	0,509	8,481	14,467	50,2
9,51	0,683	8,827	16,897	50,5
10,12	0,915	9,205	19,531	21
10,63	1,187	9,443	22,2	51,5
11,09	1,43	9,66	24,283	51,8
11,54	1,659	9,881	26,127	52,5
12,03	1,879	10,151	27,918	53
12,61	2,055	10,555	29,231	53,5
13,08	2,54	10,54	32,409	53,9

Tabulka 2: Hodnoty měření pro počáteční tlak  $p_1 = 5$  MPa

Počáteční otevírací tlak $p_1 = 7,5$ MPa				
$p_1$	$p_2$	$\Delta p$	$Q$	$t_t$
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[dm <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> ]	[°C]
7,57	0,003	7,567	0	50,4
8,07	0,003	8,067	0,162	50,3
8,59	0,007	8,583	0,547	50,3
9,08	0,024	9,056	1,809	50,1
9,53	0,049	9,481	3,138	50
10,04	0,1	9,94	5,032	49,9
10,55	0,167	10,383	6,95	49,8
11,07	0,221	10,849	8,396	49,8
11,57	0,317	11,253	10,521	49,8
12,01	0,37	11,64	11,716	50
12,54	0,465	12,075	13,593	50,2
13,05	0,554	12,496	15,188	50,3
13,52	0,648	12,872	16,493	50,7
14,14	0,867	13,273	19,006	51,2
14,65	1,034	13,616	20,721	51,7
15,04	1,209	13,831	22,409	52,3

Tabulka 3: Hodnoty měření pro počáteční tlak  $p_1 = 7,5$  MPa



Obr. 19 Výsledky jednotlivých měření

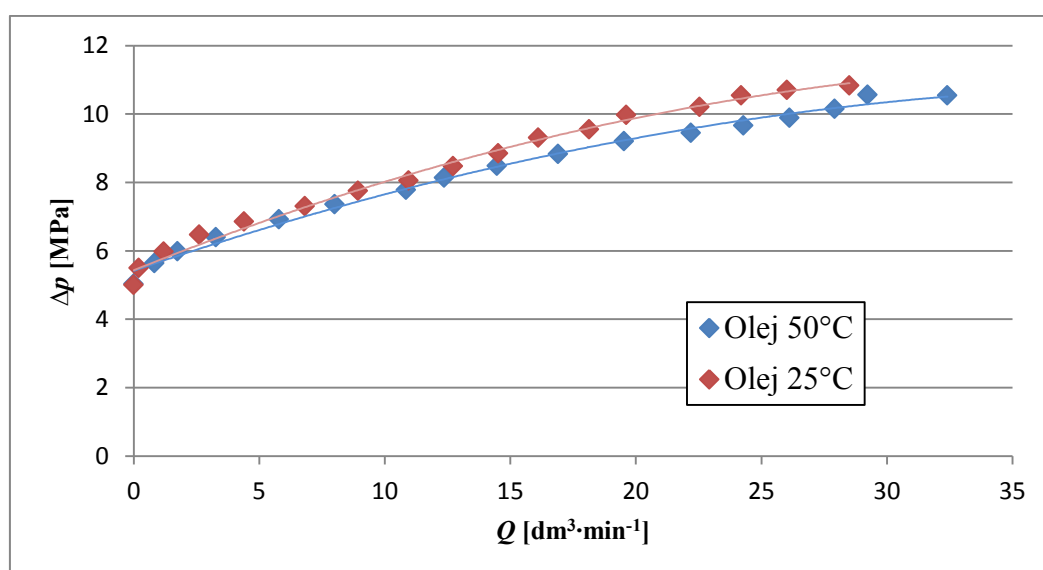
Z grafu, na obrázku 19, vyplývá, že při každém měření měla  $\Delta p - Q$  charakteristika nejprve strmější nárůst a následně se její průběh blíží kvadratické funkci.

V grafu si také můžeme všimnout, že při nižším počátečním tlaku, nedosahujeme takové maximální hodnoty, jaké je dosaženo u vyššího počátečního tlaku. Tento fakt je způsoben tím, že je pružina předepnuta na nižší tlak, díky tomu je k úplnému odtlačení šoupátka a otevření cesty zapotřebí také nižšího tlaku oleje.

Všechna předchozí měření byla provedena pro olej o teplotě přibližně  $t_t = 50^\circ\text{C}$ , na začátku jsme také provedli měření s olejem, který nebyl zahřátý a měl teplotu  $t_t = 25^\circ\text{C}$ . Toto měření bylo provedeno pro počáteční tlak  $p_1 = 5 \text{ MPa}$ .

Počáteční otevírací tlak $p_1 = 5$ MPa - Olej o teplotě 25°C				
$p_1$	$p_2$	$\Delta p$	$Q$	$t_i$
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[dm <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> ]	[°C]
5	0	5	0	25,7
5,5	0,005	5,495	0,197	25,7
6	0,029	5,971	1,2	25,8
6,54	0,066	6,474	2,615	26
6,98	0,125	6,855	4,397	26,2
7,53	0,231	7,299	6,82	26,2
8,09	0,34	7,75	8,94	26,8
8,5	0,453	8,047	10,954	27,5
9,03	0,559	8,471	12,72	28,2
9,51	0,665	8,845	14,522	29
10,07	0,767	9,303	16,108	29,7
10,47	0,92	9,55	18,134	30,8
11	1,033	9,967	19,613	31,6
11,54	1,339	10,201	22,532	32,4
12,06	1,519	10,541	24,194	33,5
12,45	1,754	10,696	26,015	34,2
12,9	2,067	10,833	28,508	35,4

Tabulka 4: Hodnoty měření pro počáteční tlak  $p_1 = 5$  MPa, pro  $t_i = 25^\circ\text{C}$



Obr. 20 Graf měření pro olej o teplotě  $t_i = 25^\circ\text{C}$  a  $t_i = 50^\circ\text{C}$



Na obr. 20 vidíme rozdíl mezi  $\Delta p - Q$  charakteristikami u oleje o teplotě  $t_t = 25^\circ\text{C}$  a oleje o teplotě  $t_t = 50^\circ\text{C}$  pro počáteční tlak  $p_1 = 5 \text{ MPa}$ . Můžeme vidět, že při průtoku oleje teploty  $50^\circ\text{C}$  ventilem, roste  $\Delta p - Q$  charakteristika méně strmě, než je tomu u oleje teploty  $t_t = 25^\circ\text{C}$ . Toto je způsobeno snižující se viskozitou při zahřívání oleje. Při nižší viskozitě olej snadněji protéká i užšími cestami a proto nedochází k tak velké tlakové ztrátě při stejném průtoku  $Q$ .

## 5 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo experimentálně zjistit  $\Delta p - Q$  charakteristiku hydraulického ventilu tlakové regulace. Pro realizaci tohoto měření bylo nutné nejprve zpracovat princip fungování ventilu. Podle měřené části ventilu byl navržen postup měření, dalším krokem byl návrh hydraulické kostky pro připojení ventilu k obvodu. V poslední fázi byl navržen hydraulický obvod potřebný ke změření charakteristiky ventilu.

V praktické části bylo následně provedeno experimentální měření na základě informací zpracovaných v teoretické části. Měření bylo provedeno pro několik různých počátečních tlaků  $p_1 = (2,5; 5; 7,5)$  MPa, přičemž bylo třeba se při zvolení těchto tlaků řídit funkčním rozsahem hydrogenerátoru. Bylo také provedeno srovnávací měření se stejným vstupním tlakem pro nezahřátý olej a pro již zahřátý olej, což umožnilo porovnat měnící se charakteristiku nejen při změně nastavení počátečního tlaku, ale také při rostoucí teplotě.

Na tuto práci je možné dále navázat měřením  $\Delta p - Q$  charakteristiky dalších částí ventilu, včetně v tomto experimentu kompletně zaslepené LS části, kterou by bylo možné měřit, jak samostatně nebo také ve spojení s PC částí.

Při měření bylo také nutné udržovat konstantní teplotu oleje, aby nedošlo k výraznému ovlivnění měřených dat. Proto byl olej mezi měřeními chlazen.

## Seznam použité literatury

- [1] WOMACK. *Pressure Compensated Hydraulic Pumps*: FLUID POWER - Design Data Sheet 62 [online]. [cit. 30.10.2015]. Dostupný na: <http://www.womackmachine.com/engineering-toolbox/design-data-sheets/pressure-compensated-hydraulic-pumps.aspx>
- [2] EATON. *Load Sensing Systems*: Principle of Operation [online]. November, 1992 [cit. 5.10.2015]. Dostupné z: [http://www.pirate4x4.com/tech/billavista/PR-Hydro\\_Steering/Eaton%20Load%20sensing%20systems%20principle%20of%20operation.pdf](http://www.pirate4x4.com/tech/billavista/PR-Hydro_Steering/Eaton%20Load%20sensing%20systems%20principle%20of%20operation.pdf)
- [3] DANFOSS. <http://powersolutions.danfoss.com> [online]. [cit. 6.1.2016]. Dostupný na: <http://powersolutions.danfoss.com/workarea/downloadasset.aspx?id=17179885858>
- [4] DANFOSS. <http://powersolutions.danfoss.com> [online]. [cit. 6.1.2016]. Dostupný na: <http://powersolutions.danfoss.com/workarea/downloadasset.aspx?id=17179885856>
- [5] DANFOSS. <http://powersolutions.danfoss.com> [online]. [cit. 12.2.2016]. Dostupný na: <http://files.danfoss.com/documents/52010519.pdf>
- [6] DANFOSS. *Open Circut Pumps*: Series 45 Frame F 74-90 cc [online]. November 2014 [cit. 21.4.2016]. Dostupný na: <http://files.danfoss.com/documents/series%2045%20frame%20f%20parts%20manual/11007197.pdf>

## Seznam obrázků

Obr. 1 Regulační hydrogenerátor [2] .....	14
Obr. 2 Hydrogenerátor a kompenzační ventil [2] .....	14
Obr. 3 Hydraulický obvod [2] .....	15
Obr. 4 Rozváděč [2] .....	15
Obr. 5 Hydraulický obvod po spuštění [2] .....	16
Obr. 6 Hydraulický obvod při PC odstavení [2] .....	17
Obr. 7 Hydraulický obvod při LS regulaci [2] .....	18
Obr. 8 Hydraulický obvod při LS odstavení[2] .....	18
Obr. 9 Odtok kapaliny z PC části ventilu [2] .....	19
Obr. 10 Příklad užití u vysokozdvížného vozíku [2] .....	20
Obr. 11 Příklad užití u čelního nakladače [3] .....	21
Obr. 12 Řez regulačním ventilem [4] .....	22
Obr. 13 Sestava ventilu [5] .....	22
Obr. 14 Hydraulická kostka .....	24
Obr. 15 Hydraulický obvod .....	24
Obr. 16 Foto z měření ventilu .....	26
Obr. 17 Foto zapojení ventilu .....	26
Obr. 18 Zapojení průtokoměru a teploměru .....	27
Obr. 19 Výsledky jednotlivých měření .....	31
Obr. 20 Graf měření pro olej o teplotě $t_t = 25^{\circ}\text{C}$ a $t_t = 50^{\circ}\text{C}$ .....	32

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Hodnoty měření pro počáteční tlak $p_1 = 2,5\text{MPa}$ .....	28
Tabulka 2: Hodnoty měření pro počáteční tlak $p_1 = 5\text{ MPa}$ .....	29
Tabulka 3: Hodnoty měření pro počáteční tlak $p_1 = 7,5\text{ MPa}$ .....	30
Tabulka 4: Hodnoty měření pro počáteční tlak $p_1 = 5\text{ MPa}$ ,     pro $t_t = 25^\circ\text{C}$ .....	32